

L la calibration d'antenne

Introduction au problème de l'autocalibration des antennes en sonar actif d'imagerie sous-marine

Introducing to the Problem of Self-Calibrating an Active Sonar Array for Underwater Imaging

par **Franck FLORIN**

THOMSON-SINTRA A.S.M.

Route de Ste Anne du Portic - 29601 Brest cedex

Résumé

Dans ce court article, on rappelle les principes de la focalisation des antennes d'imagerie sonar, on analyse la nature et l'origine des perturbations possibles, et on présente les enjeux de l'autocalibration.

Mots clés : Autocalibration, Sonar, Sonar actif, Imagerie Sonar.

Abstract

In this short paper, the principles of array focusing are reviewed, the nature and origin of possible disturbances are analyzed and the self-calibration stakes are introduced.

Key words : *Self-calibration, Sonar, Active Sonar, Sonar Imaging.*

1. Introduction

L'imagerie acoustique est aujourd'hui le principal moyen d'investigation du milieu sous-marin, tant pour les applications militaires que civiles. Cette technique consiste à utiliser les ondes sonores dont les portées dans l'eau sont nettement supérieures à celles des ondes électromagnétiques. L'imagerie est rendue possible par la diffusion des ondes au contact du fond marin. Ce phénomène de diffusion est connu sous le nom de « réverbération de fond ».

C'est le champ de réverbération qui est utilisé pour l'imagerie; il permet notamment la mise en valeur des ombres des objets proches du fond marin et leur identification comme l'illustre la figure 1.

L'image est obtenue en « focalisant » l'antenne en chaque point du fond marin. L'un des axes de représentation est obtenu par la dimension spatiale des signaux (ce sont les « voies »), l'autre par

leur dimension temporelle (évolution dans le temps du signal dans chaque voie).

L'un des systèmes les plus employés est le sonar d'imagerie latérale, illustré figure 2. Ce système est remorqué et constitué d'un poisson portant des antennes acoustiques sur ses flancs. La portée et la résolution du système dépendent à la fois de la fréquence des signaux utilisés et de la taille des antennes acoustiques.

Les performances de ce type de système dépendent directement de son aptitude à « former les voies », c'est-à-dire à additionner en phase les ondes issues d'un même point de l'espace et enregistrées par les différents capteurs de l'antenne.

Le problème statique de la calibration en phase ou focalisation, traite de la validité de la formation de ces voies spatiales. C'est celui-ci qui est exposé dans la suite. Le problème dynamique porterait sur l'évolution temporelle du signal de voies et sur les éventuels effets Doppler parasites résultants.

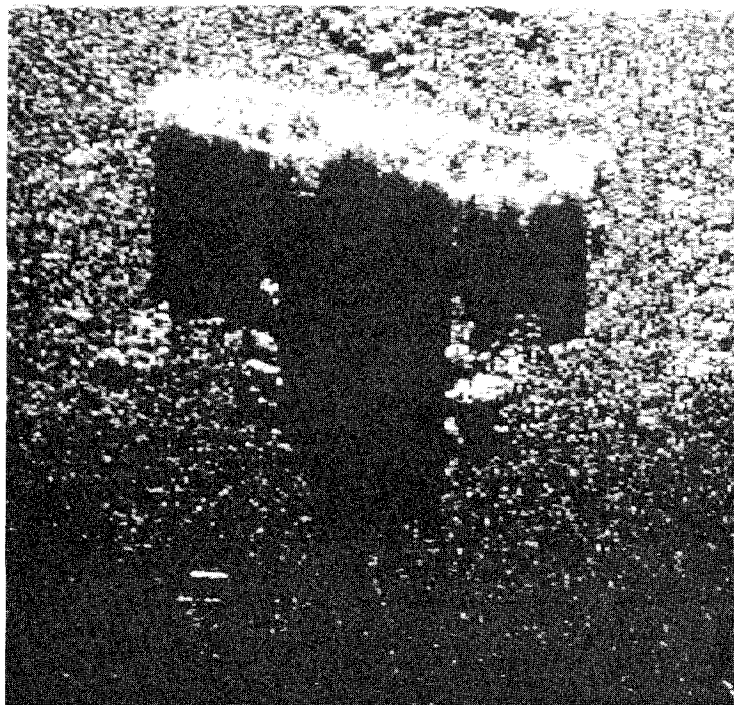


Figure 1. – Image sonar d'une épave.

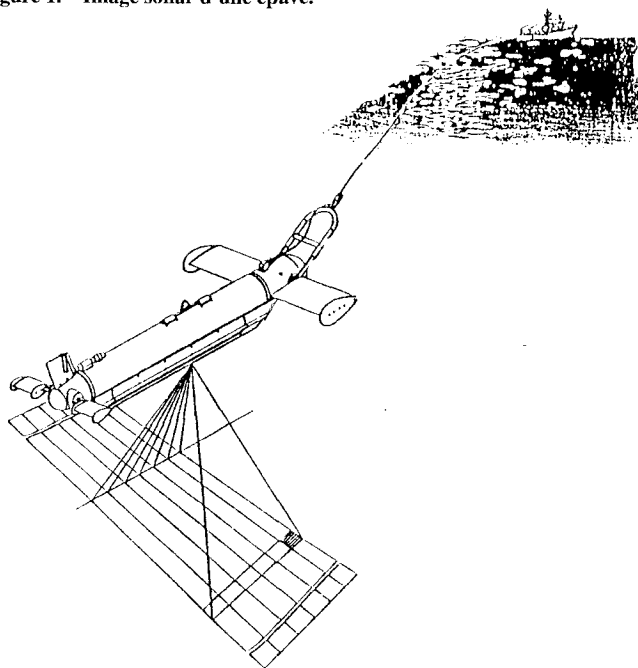


Figure 2. – Système sonar remorqué.

2. Rappel sur le principe de la focalisation et définition

2.1. FORMATION DE VOIE ET FOCALISATION

Focaliser une antenne en un point, c'est, par définition, remettre en phase (*i.e.* annuler les retards, les différences de marche) les

signaux mesurés par les différents capteurs de l'antenne et issus d'une source ponctuelle située en ce point.

Considérons dans la suite le cas d'une **antenne à M capteurs omnidirectionnels de gains normalisés à 1 en amplitude**, caractérisée par sa description paramétrique ξ_o .

Dans ce cas, le vecteur source associé à une **onde plane monochromatique** d'angle θ_o ($\theta_o =$ gisement et/ou site) s'écrit :

$$\mathbf{a}(\xi_o, \theta_o) = [\exp(i\mathbf{k}(\theta_o)^T \mathbf{r}_m(\xi_o) + i\Psi_m(\xi_o))]_{m=1, \dots, M}$$

avec :

\mathbf{k} = vecteur d'onde

\mathbf{r}_m = vecteur position du m ème capteur

Ψ_m = gain en phase du m ème capteur

$a_1 = 1$ (première composante de \mathbf{a})

(Dans le cas où l'onde n'est pas plane \mathbf{k} dépend aussi de $r_m(\xi_o)$).

Remettre en phase les signaux issus de la source d'angle θ_o (source à l'infini) consiste à effectuer le produit scalaire :

$$\delta^* \mathbf{a}(\xi_o, \theta_o)$$

avec : $\delta = [e^{i\varphi_m}]_{m=1, \dots, M}$

$$\varphi_m(\xi_o, \theta_o) = \mathbf{k}(\theta_o)^T \mathbf{r}_m(\xi_o) + \Psi_m(\xi_o)$$

C'est une **formation de voie focalisée**.

2.2. DISTORSION DE PHASE : DÉFINITION

En général, on cherche à remettre en phase les ondes issues d'une voie θ , sous hypothèse d'une antenne ξ :

$$\varphi_m(\xi, \theta) = \mathbf{k}(\theta)^T \mathbf{r}_m(\xi) + \Psi_m(\xi)$$

On dit qu'il y a distorsion de phase dès lors qu'il existe m et θ_o tels que :

$$\varphi_m(\xi, \theta) \neq (\varphi_m(\xi_o, \theta_o))$$

On note

$$\Delta\varphi_m(\xi, \xi_o, \theta, \theta_o) = \varphi_m(\xi, \theta) - \varphi_m(\xi_o, \theta_o)$$

Il y a distorsion de phase si :

$$\exists (m, \theta_o) / \Delta\varphi_m(\xi, \xi_o, \theta, \theta_o) \neq 0$$

2.3. REMARQUE SUR LA DÉPENDANCE SPATIALE DES DISTORSIONS DE PHASES

Par définition :

$$\Delta\varphi_m(\xi, \xi_o, \theta, \theta_o) = \mathbf{k}(\theta)^T \mathbf{r}_m(\xi) - \mathbf{k}(\theta_o)^T \mathbf{r}_m(\xi_o) + \Delta\Psi_m(\xi, \xi_o)$$

avec : $\Delta\Psi_m(\xi, \xi_o) = \Psi_m(\xi) - \Psi_m(\xi_o)$

La fonction de transfert de la formation de voie entre la source θ_o et la voie θ s'écrit :

$$K(\xi, \xi_o, \theta, \theta_o) = \sum_{m=1}^M e^{-i\Delta\varphi_m} \\ = \sum_{m=1}^N G_m(\xi, \xi_o, \theta_o) \exp \left[-i(\mathbf{k}(\theta) - \mathbf{k}(\theta_o))^T \mathbf{r}_m(\xi) \right]$$

avec

$$G_m(\xi, \xi_o, \theta_o) = \exp \left[i\mathbf{k}(\theta_o)^T (\mathbf{r}_m(\xi_o) - \mathbf{r}_m(\xi)) - i\Delta\Psi_m(\xi, \xi_o) \right]$$

Définitions :

- La suite $\{G_m\}_{m=1, \dots, M}$ sera appelée « suite pupille » de l'antenne ξ , par analogie à la fonction pupille des opticiens.
- On dira que les distorsions sont « isotropes » lorsque la suite pupille est indépendante de θ_o .

Propriétés :

- Il y a distorsion de phase lorsqu'il existe m et θ_o tels que $G_m(\xi, \xi_o, \theta_o) \neq 1$.
- Lorsque $\forall m \mathbf{r}_m(\xi) = \mathbf{r}_m(\xi_o)$, alors les distorsions sont isotropes ($\Delta\Psi_m(\xi, \xi_o)$ indépendant de θ_o).

Ceci est une équivalence lorsqu'il existe θ, θ'_o et θ''_o tels que $k(\theta_o), k(\theta'_o), k(\theta''_o)$ forment une base de l'espace de variation des $\mathbf{r}_m(\mathbf{R}^1, \mathbf{R}^2, \mathbf{R}^3)$.

2.4. AUTOFOCALISATION

L'autofocalisation consiste en la remise en phase des signaux sans connaissance a priori sur l'antenne ou plus précisément, sous hypothèse d'une description paramétrique de celle-ci (paramètre ξ), sans connaissance a priori de la valeur exacte (ξ_o) du paramètre.

AUTOFOCALISER l'antenne ξ_o c'est trouver ξ tel que :

$$\Delta\varphi_m(\xi, \xi_o, \theta_o, \theta_o) = 0 \quad \forall \theta_o \in \Theta_o \quad \forall m = 1, \dots, M$$

où par définition $\Theta_o = \{\theta_o / \exists \text{ une source d'angle d'incidence } \theta_o\}$

Pour simplifier le problème, on le limite en général au problème bidimensionnel : la source et les capteurs sont dans le même plan $x - y$. L'information angulaire se limite au seul gisement.

3. Nature des perturbations

On peut distinguer deux catégories de perturbations pour lesquelles la phase est distordue, *i.e.* pour lesquelles :

$$\exists (m, \theta_o) / \Delta\varphi_m(\xi, \xi_o, \theta_o, \theta_o) \neq 0$$

3.1. PERTURBATIONS DUES AU MILIEU

C'est le cas où le modèle de front d'onde est méconnu. Ceci est traduit par le fait qu'au point $\mathbf{r}_m(\xi_o)$ le vecteur d'onde n'est pas $\mathbf{k}(\theta_o)$ mais $\mathbf{k}(\theta_o) + \delta\mathbf{k}_m(\theta_o)$.

L'erreur de phase correspondante au point m est donc donnée par :

$$\delta\mathbf{k}_m(\theta_o)^T \mathbf{r}_m(\xi_o)$$

Ce cas est rencontré en optique astronomique : la lumière d'une étoile est observée par un télescope au travers d'une atmosphère turbulente. L'onde plane issue de l'étoile observée est déformée par les inhomogénéités de la couche atmosphérique. L'image formée est alors fractionnée en « tâches » (speckles).

Lorsque l'on observe deux étoiles angulairement proches, on peut considérer que les ondes planes correspondantes ont traversé les mêmes couches de l'atmosphère de sorte que les perturbations sont identiques : $\delta\mathbf{k}_m$ est le même pour toutes les ondes. La distorsion de phase $\delta\mathbf{k}_m^T \mathbf{r}_m$ est alors indépendante (localement) de la position de la source. Cette condition d'isotropie locale, compte tenu de la planéité de l'onde non distordue, est appelée par les astronomes condition d'isoplanétisme. Le même type de phénomène a été étudié en acoustique sous-marine [Kopp 81].

3.2. PERTURBATIONS DUES A L'ANTENNE

Ce type de perturbation peut se diviser en deux catégories :

- les erreurs de gains des capteurs (chaîne électronique comprise, amplification notamment). Celles-ci ont une contribution à la défocalisation donnée par $\Delta\Psi_m = \Psi_m(\xi) - \Psi_m(\xi_o)$ terme d'erreur de phase.

Cette distorsion est par nature isotrope si le capteur est « ponctuel ». En pratique, cette hypothèse n'est bien sûr qu'une approximation qui est toutefois en général bien vérifiée en acoustique si les dimensions du capteur sont inférieures à la longueur d'onde, ou si son ouverture d'utilisation est judicieusement choisie (très inférieure à la largeur du lobe de directivité du capteur);

- les erreurs de position des capteurs. Dans ce cas, la distorsion est typiquement donnée par : $\Delta\varphi_m = \mathbf{k}_m(\theta)^T \Delta\mathbf{r}_m = \mathbf{k}_m^T (\mathbf{r}_m(\xi) - \mathbf{r}_m(\xi_o))$

On considère généralement que ce type de distorsion est négligeable lorsque $\|\Delta\mathbf{r}\| < \frac{\lambda}{8}$ (perte de 3 dB sur une sinusoïde).

Notons que ce type de distorsion est par nature anisotrope. Lorsque les amplitudes des distorsions sont faibles, elles peuvent malgré tout parfois être considérées comme isotropes et, sous hypothèse complémentaire de front d'onde plan et d'antenne quasi-plane, la condition d'isoplanétisme est alors approximativement vérifiée.

4. Enjeu de l'autofocalisation

Les performances d'un système d'imagerie sont fonctions de sa résolution (c'est-à-dire du niveau de détail visible) et de son taux de couverture horaire (c'est-à-dire de la surface du fond imagée par heure). Le taux de couverture horaire dépend à la fois de la vitesse de déplacement du système et de la portée de ses moyens acoustiques.

L'augmentation des performances d'un système d'imagerie latérale passe d'une part par la diminution de la fréquence pour augmenter la portée (mais cette opération dégrade la résolution), d'autre part par l'augmentation de la taille de l'antenne réceptrice pour améliorer la résolution.

Par exemple une antenne de 20 mètres fonctionnant à 100 KHz devrait obtenir 0,5 m de résolution à 700 mètres, tandis qu'une antenne de 10 mètres fonctionnant à 12 KHz permettrait 22 mètres de résolution à 2000 mètres.

La taille des antennes actuelles est limitée par celle du poisson sur lequel elles sont montées (< 5 m).

En effet, les spécifications techniques des antennes imposent un positionnement de leurs capteurs élémentaires à mieux que $\lambda/8$. Ceci entraîne outre les contraintes sur la fabrication des capteurs eux-mêmes, des contraintes sur la rigidité et la résistance en pression de leur support. Les dimensions actuelles des poissons sont telles que les plus gros d'entre eux ont un poids dépassant la tonne et nécessitent de ce fait des moyens de mise en œuvre volumineux et coûteux.

L'enjeu de l'autocalibration est de relaxer la contrainte mécanique sur les positions des capteurs en mesurant l'évolution de ces positions au cours du temps. (Si cette évolution est lente, on peut supposer les capteurs immobiles sur la durée utile d'enregistrement des signaux acoustiques.)

5. Particularités du problème en sonar d'imagerie

En sonar passif l'emploi d'antennes déformables, les flûtes, est devenu courant aux très basses fréquences (< 3 KHz). On est tenté d'adopter en imagerie haute fréquence (HF, > 10 KHz) une technique similaire (cf (2), (3) et (5)), illustrée par la figure 3 et dans laquelle un poisson portant une antenne active HF de dimensions réduites traîne une flûte HF passive permettant d'obtenir la résolution souhaitée.

L'antenne active assure l'insonification d'un secteur large tandis que l'antenne passive place à l'intérieur du lobe d'insonification les pinceaux étroits de la réception (figure 4).

En très basse fréquence l'instrumentation des flûtes par des boussoles magnétiques, conjointe à l'emploi de filtres de poursuite permet une localisation des capteurs acoustiques avec une précision

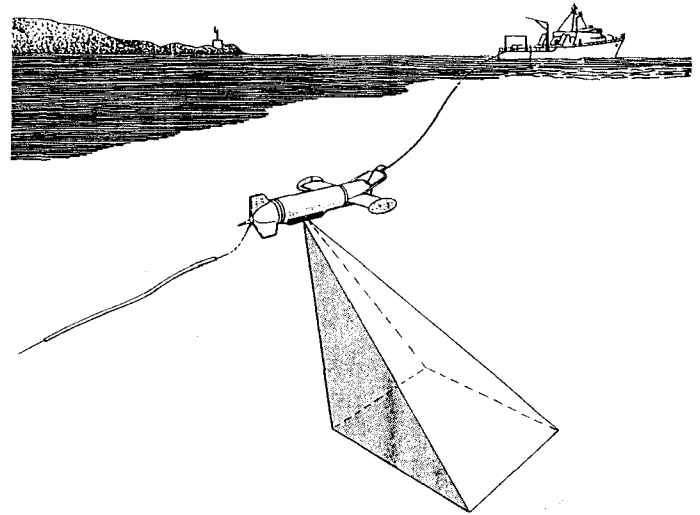


Figure 3. – Système sonar remorqué avec flûte haute fréquence.

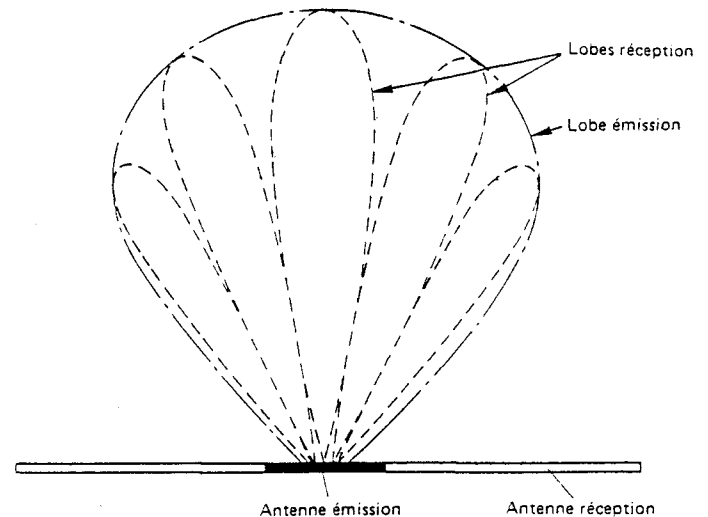


Figure 4. – Antenne classique : lobes de réception à l'intérieur du lobe d'émission.

de l'ordre de 10 à 30 cm (J.L. Riley, communication privée, et (6-7)). Cette précision est très insuffisante pour l'imagerie HF comme on le verra ultérieurement : une des particularités du problème est l'importance des distorsions en comparaison de la longueur d'onde.

L'autre particularité du problème de l'autofocalisation en imagerie acoustique sous-marine provient de la nature des signaux observés : le phénomène de réverbération se modélise sous la forme d'un champ « diffus » continu, qui écarte a priori les méthodes d'autofocalisation à partir d'un (ou plusieurs) réflecteur ponctuel identifiable.

La focalisation des antennes d'imagerie acoustique devra donc passer par l'emploi de techniques spécifiques.

6. Conclusion

L'autocalibration des antennes d'imagerie acoustique n'est pas, à ce jour, un problème entièrement résolu : même si les méthodes mathématiques ont été identifiées, de nombreuses limitations techniques et technologiques doivent être prises en compte avant l'implantation opérationnelle des algorithmes au sein de systèmes utilisant des antennes à contraintes mécaniques relaxées (5).

Notons enfin que le problème de calibration se retrouve dans la réalisation de systèmes à antennes synthétiques, pour lesquels la navigation et le positionnement dynamique sont d'une importance vitale.

Remerciements

L'auteur de ce chapitre tient à exprimer toute sa gratitude à la DRET pour son soutien et l'intérêt qu'elle porte au problème de l'autocalibration des systèmes d'imagerie acoustique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] THOMSON-SINTRA Activités Sous-Marines, Rapports d'études.
- [2] F. FLORIN, G. KERVERN, D. BARDET, « Autofocalisation d'une antenne d'imagerie sous-marine », *Proceedings GRETSI 91*, Sept. 1991.
- [3] F. FLORIN, « A Distorted Array Focusing Technique for Sonar Imaging », *NATO ASI on ocean exploration*, Funchal, Madère, Juillet-Août 1992, pp. 473-478.
- [4] F. FLORIN, « Contributions aux traitements d'antennes passif et actif à l'aide du formalisme algébrique », Thèse de l'Université de Rennes I, sept. 1994.
- [5] F. FLORIN, « Calibration of high frequency deformable imaging towed arrays », *Oceans* sept. 1994.
- [6] J.L. RILEY, D.A. GRAY, B.G FERGUSON, « Estimating the shape of a towed array of hydrophones using both acoustic and non-acoustic sensor techniques », *NATO ASI on ocean exploration*, Funchal, Madère, Juillet-Août, 1992, pp. 255-260.
- [7] D.A. GRAY, J.L. RILEY, D.A. HOLDSWORTH, « Effect of biased compasses on towed array shape estimates obtained from Kalman filters », *NATO ASI on ocean exploration*, Funchal, Madère, Juillet-Août, 1992, pp. 261-266.